

**ИЗМЕРЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА ТРУБ ВНУТРЕННИМ ПРОХОДНЫМ ВТП  
(USING INTERNAL EDDY CURRENT PASSING TRANSDUCER TO MEASURE TUBE'S  
INNER DIAMETER)**

Ван Юй  
WangYu

Национальный исследовательский Томский политехнический университет  
E-mail: wangyu1211@mail.ru

В настоящее время металлические трубы в промышленной области широко используются. Труба является ключевым элементом многих конструкций. В процессе эксплуатации возможно изменение внутреннего диаметра из-за механического воздействия и коррозии. Разработано много различных методов и средств измерения внутреннего диаметра. В статье изучены физические основы вихретокового метода измерительных преобразований, проведена классификация вихретоковых преобразователей. Экспериментально определены годографы вносимого сопротивления ВТП, проанализирована зависимость вносимого комплексного сопротивления от частоты входного сигнала, внутреннего диаметра и зазора. Проанализированы причины вызывающих погрешность, предложены методы и средства для уменьшения погрешности измерения.

(Nowadays, metal tubes are widely used in the industrial field, and tubes are the key to many structures. In the process of use, mechanical action and corrosion may cause the change of the tube's inner diameter. There are several ways to measure the inner diameter, this paper mainly introduces the theoretical basis of eddy current sensor measurement, enumerates the classification of the eddy current transducer. Experimentally determined hodograph of additional resistance of curve eddy current transducer, analyzes dependence of the impedance introduced by the frequency of the input signal, the inner diameter and gap between tube and transducer. Analyzes the reasons of the error, at last I list some advice to minimize measurement errors.)

**Ключевые слова:**

Проходной вихретоковый преобразователь, измерение внутреннего диаметра, система вихретокового контроля.

(Internal eddy current passing transducer, inner diameter measurement, eddy current measurement system.)

**Введение**

Металлические трубы в промышленной области широко используются. Труба является ключевым элементом многих конструкций. В процессе эксплуатации возможно изменение внутреннего диаметра из-за механического воздействия и коррозии. В производстве также нужно измерять исходные внутренние диаметры труб. Таким образом, измерение внутреннего диаметра труб является актуальной задачей неразрушающего контроля.

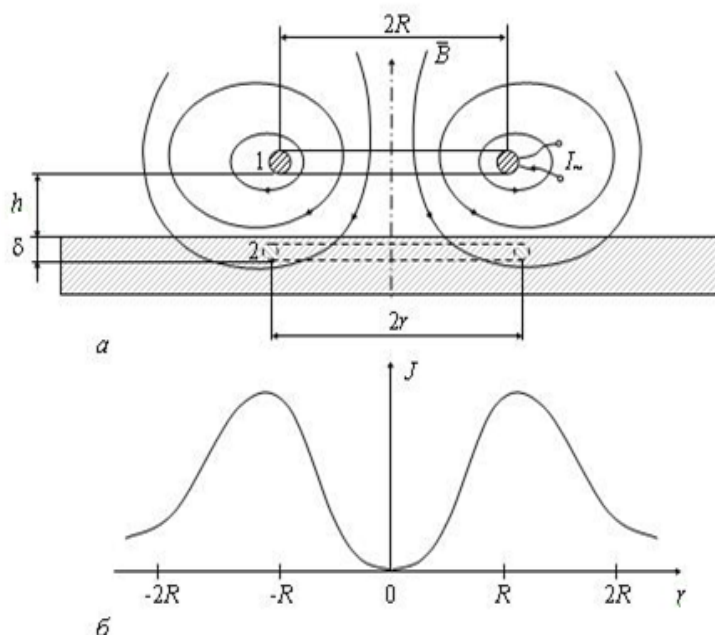
В настоящее время разработано много различных методов и средств измерения внутреннего диаметра. Основные методы измерения внутреннего диаметра следующие: механический, акустический, оптический, вихретоковый (электромагнитный), ёмкостный и т.д.

Особенность вихретокового контроля в том, что его можно проводить без контакта преобразователя и объекта, и преобразователь может свободно двигаться относительно объекта даже при высоких скоростях. На сигналы преобразователя практически не влияют влажность, давление и загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта.[1]

**1. Физические основы вихретокового метода измерительных преобразований**

Измерительные преобразования в полях вихревых токов основаны на возбуждении в электропроводящих объектах переменным магнитным полем вихревых токов и зависимости параметров этих токов от свойств объекта.

На рисунке 1 приведен принцип объяснения возбуждения вихревого тока в электропроводящих объектах :



**Рис. 1.** Круглая обмотка с переменным током (а) и радиальное распределение плотности вихревых токов в электропроводящем объекте (б): 1 – обмотка с переменным током; 2 – контур вихревого тока.

В качестве источника переменного магнитного поля в большинстве случаев используется обмотка с переменным электрическим током (обмотка возбуждения, ток возбуждения). Если такую обмотку поместить вблизи электропроводящего объекта, например пластины (рис. 1а), то магнитное поле обмотки будет создавать в объекте некоторый магнитный поток. Ввиду переменного характера магнитного поля и создаваемый магнитный поток будет переменным (изменяющимся во времени). В соответствии с законом электромагнитной индукции изменяющийся во времени магнитный поток создает вихревое электрическое поле, напряженность  $E$  которого связана с индукцией  $B$  магнитного поля соотношением:

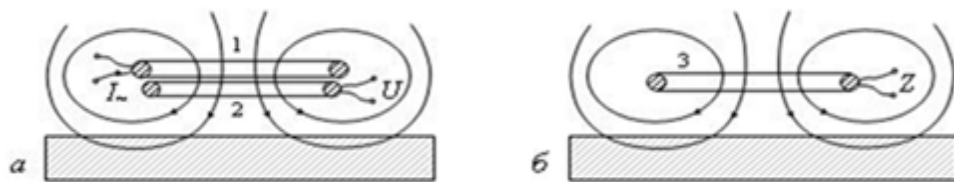
$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Наличие электрического поля в электропроводящей среде приводит к появлению электрического тока, плотность которого  $J$  прямо пропорциональна напряженности электрического поля и удельной электрической проводимости материала  $\sigma$ :  $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ . Этот электрический ток совпадает по направлению с линиями напряженности индуцируемого электрического поля и соответственно имеет также вихревой характер. Вихревые токи замыкаются непосредственно в электропроводящем объекте, образуя вихреобразные контуры, сцепляющиеся с индуктирующим их магнитным потоком.

Вихревые токи имеют собственное магнитное поле. Согласно закону Лоренца переменное магнитное поле вихревых токов стремится противодействовать изменениям магнитного потока, индуктирующего вихревые токи.[2]

## 2. Классификация вихретоковых преобразователей (ВТП)

В настоящее время разработано большое количество типов и разновидностей ВТП. Для более правильного их использования целесообразно знать их классификацию. Можно предложить несколько различных классификационных признаков. Прежде всего по типу преобразования параметров ОК в выходной сигнал ВТП подразделяются на параметрические и трансформаторные (рис. 2 а, б). Преимущество параметрических ВТП заключается в их простоте, а недостаток, который значительно слабее выражен в трансформаторных ВТП, в зависимости выходного сигнала от температуры преобразователя.

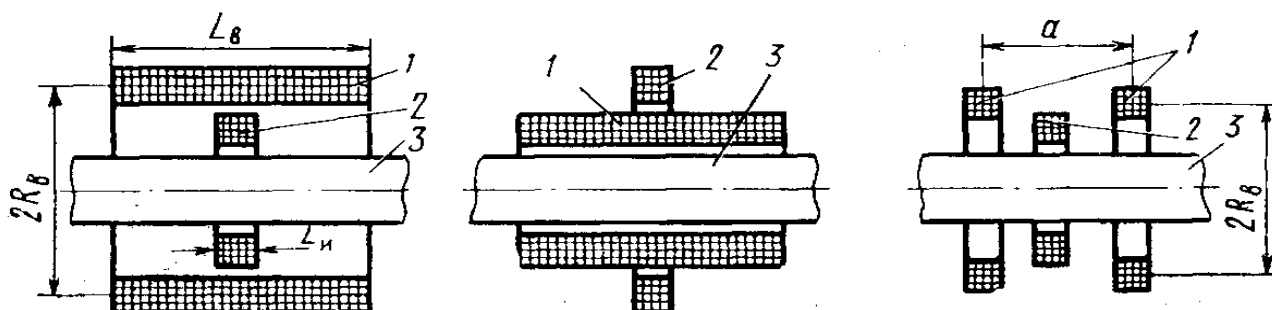


**Рис. 2.** Трансформаторный (а) и параметрический (б) ВТП:  
1 – обмотка возбуждения; 2 – измерительная обмотка;  
3 – обмотка индуктивности.

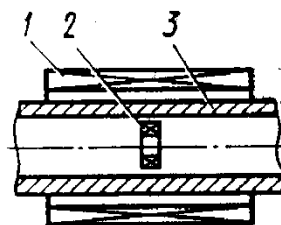
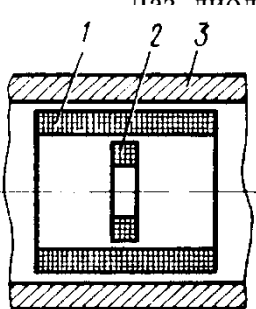
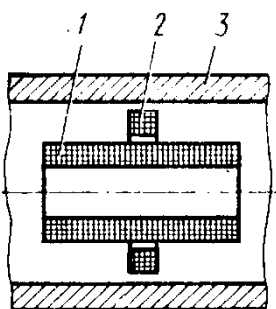
В зависимости от расположения ВТП по отношению к объекту контроля их делят на проходные, накладные и комбинированные.

Проходные ВТП обычно делят на наружные, внутренние, погружные и экранные. На рис. 3 показаны разновидности трансформаторных наружных проходных ВТП. Основной особенностью их является то, что катушки ВТП охватывают ОК.

Катушки внутренних проходных ВТП вводят внутрь ОК (рис. 4) чаще всего они служат

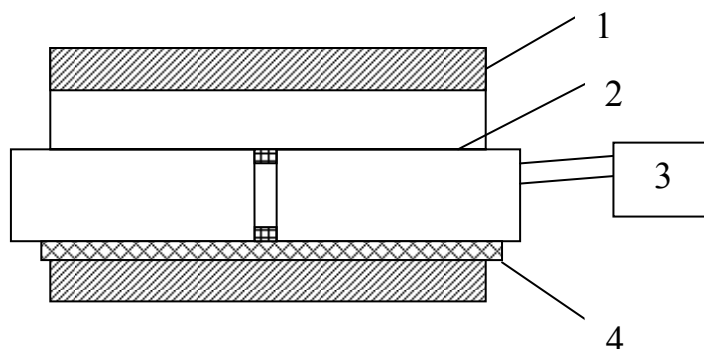


**Рис. 3.** Проходные наружные ВТП  
Пер. тип 1

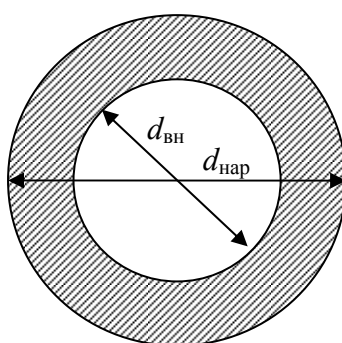


**Рис. 4.** Проходные внутренние ВТП

**Рис. 5.** Экранный проходной ВТПЗС фотоприёмник ?



**Рис. 6.** Схема измерения внутреннего диаметра параметрическим проходным вихретоковым преобразователем: 1 – труба; 2 – вихретоковый преобразователь; 3 – измеритель R, L, C; 4 – диэлектрические прокладки



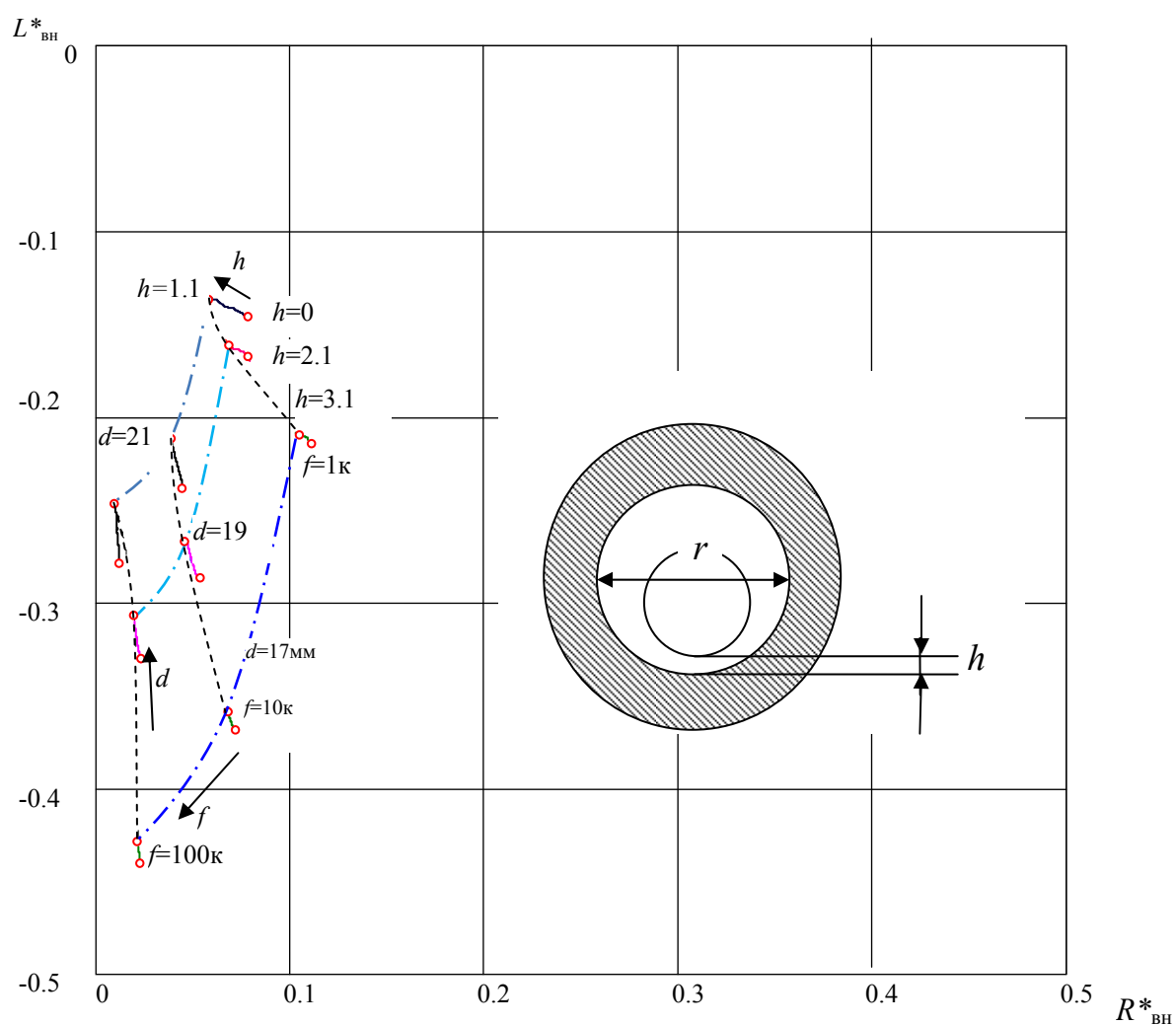
**Рис.7.** Внутренний и наружный диаметры трубы

**Таблица1.** Размеры внутреннего и наружного диаметров труб

Номер труб	$d_{нар}$ , мм	$d_{вн}$ , мм
1	45	17
2	45	19
3	45	21

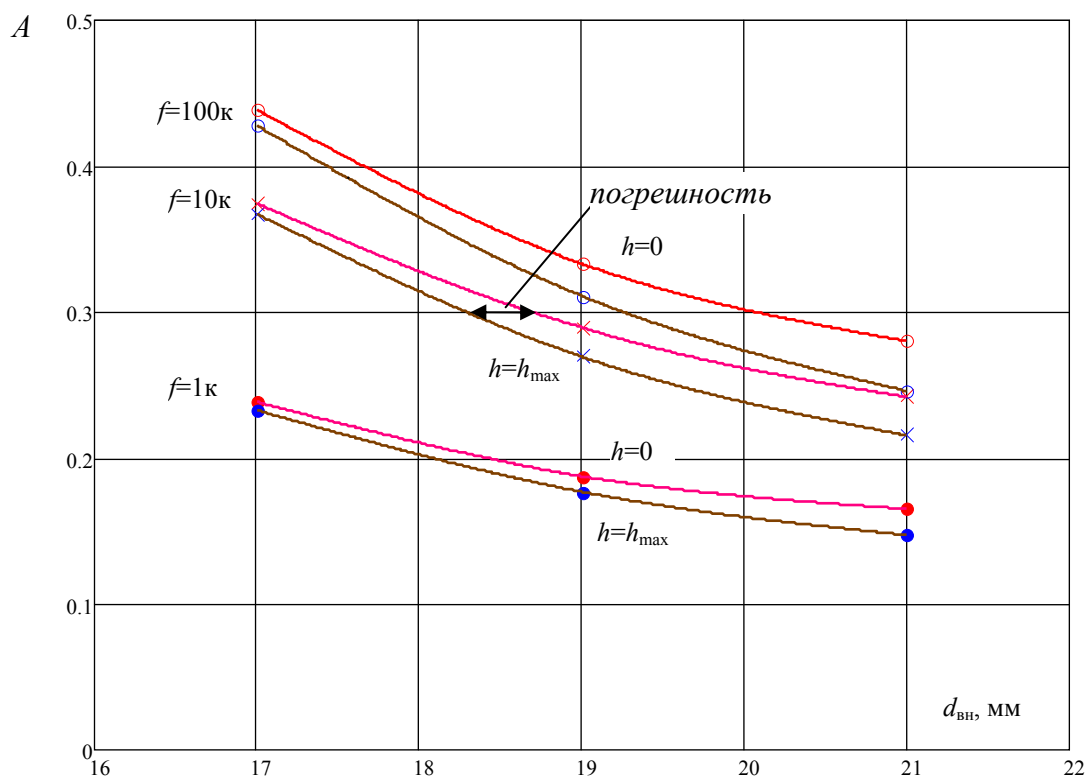
#### 4. Результаты работы

На рис.8 показаны годографы вносимого сопротивления проходного вихретокового преобразователя, имеющего обмотки и расположенного в трубе, от изменения внутреннего диаметра, зазора, частоты входного сигнала и электропроводимости. Штрихпунктирной сплошной линией показан годограф от изменения электропроводимости частоты (или электропроводимости). Очевидно, что, чем частота больше, тем амплитуда больше и фаза уменьшается к  $90^\circ$ . Сплошной линией показан годограф от изменения зазора. При наибольшем зазоре амплитуда минимальная и сравнимая их, очевидно, что погрешность зависит от отверстия. Пунктирной линией показан годограф от изменения внутреннего диаметра труб. Очевидно, что амплитуда изменяется от внутреннего диаметра, чем больше внутренний диаметр у трубы, тем меньше амплитуда относительного вносимого комплексного электрического сопротивления. Частота не сильно зависит от внутреннего диаметра. Она зависит от частоты, но в узком диапазоне, можно измерить и фазу и амплитуду, чтобы уточнить результаты измерения. Вообще говоря, для измерения внутреннего диаметра нужно выбрать, в качестве параметра, амплитуду.



**Рис.8.** Годографы вносимого сопротивления проходного вихретокового преобразователя в трубе от изменения частоты, зазора, внутреннего диаметра трубы

Рассмотрим зависимость амплитуды от разных параметров.



**Рис.9.** Зависимость амплитуды вносимого сопротивления от зазора, от частоты, от внутреннего диаметра проходным вихретоковым методом

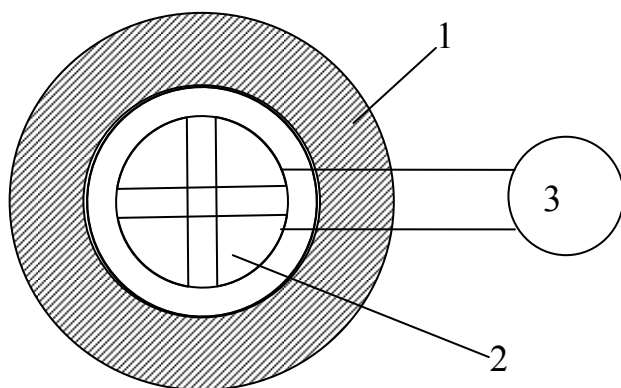
Следует отметить, что источником возможной погрешности является смещение ВТП относительно продольной оси трубы. Амплитуда вносимого сопротивления изменяется от зазора. Сравним две линии, показанные на рис. 9, между собой, при одних и тех же частоте и диаметре, но амплитуда  $h=0$  больше чем амплитуда  $h=h_{\text{max}}$ , например, как показано, при частоте 10 кГц и  $A=0,3$ , разница между двумя линиями – погрешность.

##### 5. Методы для уменьшения погрешности

Когда преобразователь находится в центре и на границе, значения вносимого сопротивления отличаются. Амплитуда изменяется от зазора. При наибольшем зазоре амплитуда минимальная. Для исключения этой погрешности можно использовать фиксацию зазора. Для этого преобразователь должен находиться либо в центре трубы, либо быть прижатым к внутренней стенке трубы.

Ниже описаны разные методы и конструкции для уменьшения погрешности от изменения зазора:

1. У преобразователя четыре симметричные обмотки, включенные дифференциально. Измерительные действия происходят только тогда, когда показание вольтметра равно нулю, чтобы обеспечить преобразователь в центре трубы.

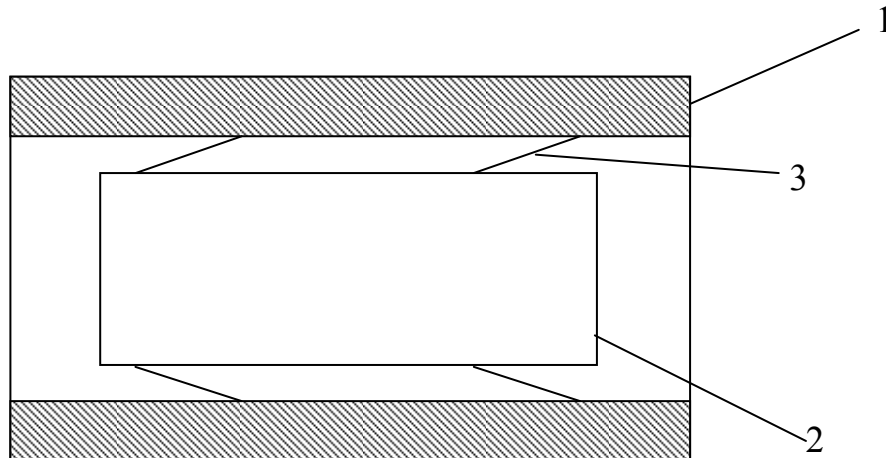


**Рис.10.** Конструкция первого варианта улучшения измерения внутреннего диаметра проходным вихретоковым преобразователем:

1 – труба; 2 – преобразователь, имеющий четыре симметричные обмотки;  
3 – вольтметр

Преимущества этого метода заключаются в отсутствии необходимости контакта с поверхностью трубы, простоте структуры и возможности автоматизации измерения. Но магнитное поле дополнительных обмоток влияет на результаты измерения, поэтому следует предусмотреть различные частоты двух сигналов и использовать фильтр для исключения разделения частот.

2. С помощью упругой втулки или трехлапчатой структуры, обеспечивать нахождения преобразователя в центре трубы. Но требуется контакт с поверхностью трубы и трудно выполнить измерения на высокой скорости и неровной поверхности трубы.



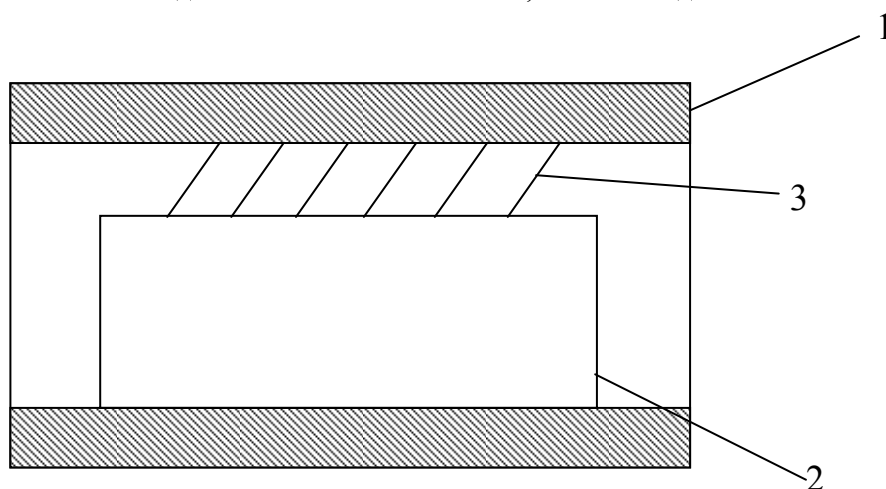
**Рис.11.** Конструкция второго варианта улучшения измерения внутреннего диаметра проходным вихретоковым преобразователем: 1 – труба; 2 – вихретоковый преобразователь; 3 – упругая втулка



**Рис.12.**Трехкулачковая структура

3. Используются пружинные распорки, для того чтобы прижать преобразователь к внутренней стенке. В этом случае фиксируется нулевое значение зазора и исключается его изменение.

Основные недостатки заключается в том, что необходим контакт с поверхностью трубы.



**Рис.13.** Конструкция третьего варианта улучшения измерения внутреннего диаметра проходным вихрековым преобразователем: 1 – труба; 2 – вихрековый преобразователь; 3 –распорка

4. Подготовить несколько преобразователей, у которых разные диаметры. Таким образом можно обеспечить малое значение зазора и тогда погрешность будет пренебрежимо малой. Стоимость увеличивается и применять только для труб с высокой прямолинейностью.

#### **6. Заключение**

Изучены физические основы вихрекового метода, определены годографы вносимого сопротивления, проанализирована зависимость вносимого комплексного сопротивления от частоты входного сигнала, внутреннего диаметра и зазора, сформированы методы для уменьшения погрешности.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Неразрушающий контроль. Справочник / под ред. В.В. Клюева: в 7 томах. Т 2: в 2-х кн.: Кн. 1: Контроль герметичности. Кн. 2: Вихрековый контроль. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с.
2. Физические основы получения информации: учебник / А.Е. Гольдштейн; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 292 с.

#### **Сведения об авторах:**

**Ван Юй:** г. Томск, студент гр.151Б02 кафедры Информационно-измерительная техника Национального исследовательского Томского политехнического университета.